

槽波地震勘探技术在煤矿隐伏断层探测中的应用

——以钱营孜煤矿为例

张小虎^{1*}, 王宗涛², 兰鹏波², 孙伟豪², 任 川²

(1. 安徽恒源煤电股份有限公司钱营孜煤矿, 安徽 宿州 234116;
2. 安徽惠洲地质安全研究院股份有限公司, 合肥 231200)

摘 要: 隐伏断层的存在对煤炭回采过程中的生产安全构成严重隐患, 查明煤矿隐伏断裂构造是保障工作面顺利回采及未来高效安全生产的重要举措。本文采用槽波物探方法对钱营孜煤矿 W₃32 工作面开展工作, 旨在查明研究区内断裂构造发育情况及隐伏地质体。通过对研究区槽波能量衰减和纵横波速度反演进行对比分析, 辅以反射偏移成像最低, 在研究区内解译异常区 33 个, 其中断层影响区 24 个, 煤层变薄区 7 个, 顶板“穿刺”构造影响区 2 个, 为研究区煤矿安全生产提供了重要支撑。

关键词: 槽波地震勘探; 隐伏构造; 断层; 煤层变薄区; 钱营孜煤矿

中图分类号: P631.4+1

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2025)06-0050-9

0 引言

随着煤矿开采深度的递增, 地质条件变得更加复杂, 特别是隐伏地质构造和地下水分布预测不清, 是煤矿瓦斯爆炸和突水安全事故的主要原因。有调查显示, 煤矿生产中瓦斯爆炸和突水事故伤亡率占比 60%—70%^[1]。传统的探测方法中, 地面三维地震适用于大型构造探测, 但对小构造精度不足; 无线电波透视则受井下设备干扰较大, 探测效果不佳。以上方法均难以满足现今煤矿安全生产需求^[2-5]。相比之下, 槽波地震技术因其精度高、抗干扰能力强、探测距离大等优势, 成为探测煤矿隐伏断裂构造的主要手段^[6]。

槽波地震勘探技术的发展历程始于 20 世纪中期。Evison^[7]首次在煤层中成功激发并记录了煤层波, 揭示了其独特的频散特性。T. C. Krey^[8]通过理论计算和实验研究, 进一步阐明了槽波的频散关系, 为后续研究奠定了基础。德国学者 Eson 和 Schott^[9]在多个煤矿区开展了反射槽波试验, 并在数据处理中引入了极化滤波与包络叠加技术, 进一步提高了数据的解析能力。我

国自 20 世纪 80 年代末开始进行槽波地震研究, 经过多年的理论探索和实践积累, 取得了显著成效^[10-13]。

近年来, 随着煤矿机械化程度和安全要求的提高, 工作面内部小断层、陷落柱等地质异常体引发的安全问题日益突出^[14-18]。槽波地震勘探技术能够精确识别小断层、煤层分叉、变薄带及采空区, 具有波形易识别、探测距离远等特点^[19-24], 其探测结果为开采设计提供了重要依据。

本文以钱营孜煤矿 W₃32 工作面回采前地质探查工程为研究背景, 采用槽波地震物探技术对断层进行发育情况及工作面内其他隐伏的地质异常体进行精细勘探, 为工作面回采前应用槽波地震勘探技术对煤矿隐伏断层进行探测和分析提供了一定的借鉴和指导依据。

1 槽波地震勘探技术

1.1 槽波地震原理

槽波地震勘探 (ISS) 是利用在煤层中激发和传播的导波探查煤层不连续性的一种地球物理

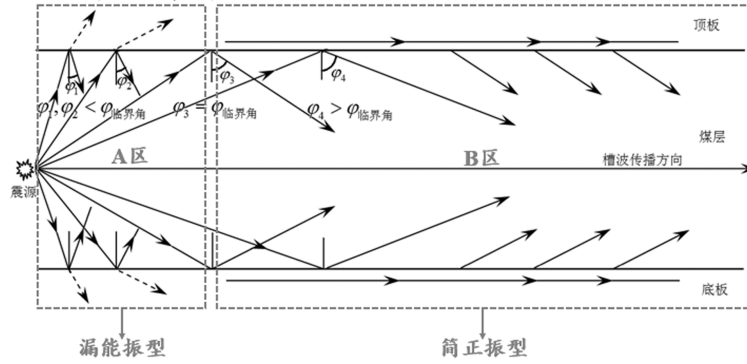


图1 煤层中地震槽波的传播形式和振型

方法。槽波在煤层中激发,通过同一煤层传播、衰减和反射,并在同一煤层中被接收。

槽波在不同入射角度下在煤层中的传播形式和振型存在差异。当煤层中激发的体波入射角小于临界角入射到煤-岩分界面时,会发生折射作用,以体波的形式向围岩辐射,导致地震波在煤层内来回反射过程中,迅速衰减而消失,形成所谓的“泄漏”振型;当体波入射角大于临界角入射到煤-岩分界面,会发生全反射,地震波的能量被限制在煤层及邻近岩石的薄层中,不向围岩辐射而产生损耗,形成了简正振型(图1)。通过对波形的分析可以区分泄漏振型与简正振型,进而反演煤层厚度、识别内部缺陷、评估围岩性质及应力状态,为煤层结构探测与工程安全提

供定量依据。

1.2 槽波地震勘探方法

槽波勘探的基本观测方法为透射法和反射法。透射法槽波测量,震源与检波器(排列)布置在不同的巷道内。在一条巷道内激发,另一条巷道中接收通过采区或盘区的透射槽波(图2)。目前,在厚约属薄煤层 1.3~3.5m 中厚煤层中,最大透射距离可达 1000m 以上。

反射槽波测量,震源与检波器排列布置在同一巷道内,在煤层中激发和接收槽波(图3)。测量过程中,当工作面存在断层等地质异常体或煤层出现横向不连续时,会形成很强的波阻抗分界面,从而产生反射或部分反射。

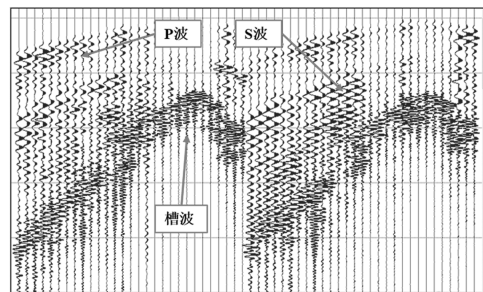
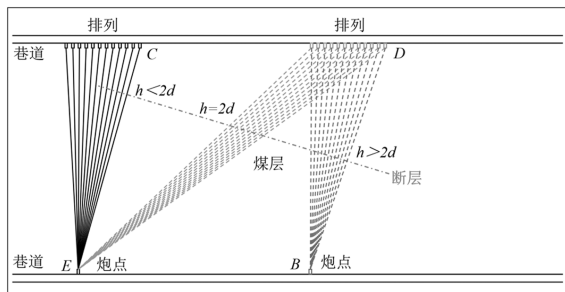


图2 煤层中透射槽波勘探方法及透射槽波特征

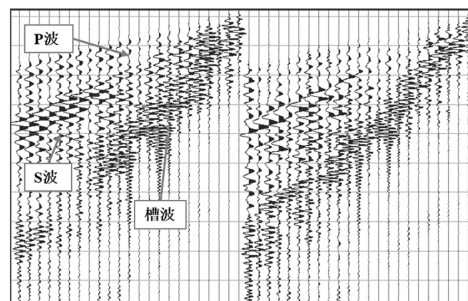
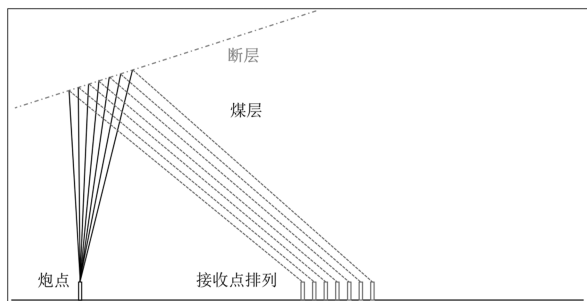


图3 煤层中反射槽波勘探方法及透射槽波特征

1.3 成像反演数据处理方法

槽波勘探后需按照一定的物理和数学关系反演工作面内部参数。槽波依据不同的物理构成及极化特征,分为 Love 型槽波和 Rayleigh 型槽波。对于简单的顶板-煤层-底板 3 层对称模型,煤层中激发的地震波在煤层中的传播速度明显低于沿顶底板的传播速度,会在煤层中多次反射而产生干涉现象形成槽波,Love 型槽波传播规律如下:

$$\frac{\omega d}{c} \sqrt{\frac{c^2}{v_{s2}^2} - 1} = \arctan \left[\frac{\mu_1 \sqrt{1 - \frac{c^2}{v_{s1}^2}}}{\mu_2 \sqrt{\frac{c^2}{v_{s2}^2} - 1}} \right] + n\pi, n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: ω 为圆频率; d 为 1/2 煤层厚度; c 为 Love 型槽波相速度,有 $v_{s2} \leq c \leq v_{s1}$; v_{s1}, v_{s2} 为围岩与煤层横波速度; μ_1, μ_2 为围岩与煤层的剪切模量; n 为槽波振型阶数,当 $n=0$ 时频散为基阶模式,且 Love 型槽波以基阶模式频散为主。只考虑基阶模式,式(1)可简化为:

$$d = \frac{cv_{s2}}{\pi f \sqrt{c^2 - v_{s2}^2}} \arctan \left[\frac{\mu_1 \sqrt{1 - \frac{c^2}{v_{s1}^2}}}{\mu_2 \sqrt{\frac{c^2}{v_{s2}^2} - 1}} \right] \quad (2)$$

式(2)给出了相速度 c 与煤层厚度 d 之间的关系,但应用地震层析成像技术需要获取槽波群速度 u 进行求解,因此需要首先依据已知槽波的传播时间 T 的情况下求解地下介质的槽波群速度 u 。槽波的传播时间 T 是对地下介质慢度函数沿着波的传播射线路径的进行线性积分,可表示为:

$$T = \int_s^r s(x, z) dl \quad (3)$$

式中, $s(x, z)$ 为地下介质的慢度函数; dl 为波的射线路径的微分。

对式(3)进行离散化,并表示为如下的矩阵形式为:

$$T = AS \quad (4)$$

式中, T 为所有炮点到检波点的传播时间矩

阵; S 为地下介质的慢度矩阵; A 为与地震波传播射线路径有关的距离矩阵。

利用煤矿地震槽波探测软件(CSSWD)经反复迭代求解式(4)矩阵并求解波群速度 u 。为进一步确定工作面的煤层厚度分布,必须建立群速度 u 与煤层厚度 d 之间的数学关系。槽波可以看作是由频率不同的简谐波在煤层中传播时相互干涉形成的一种复杂的合成振动信号。由于频散作用,合成信号以一种独立的速度传播,振幅极大值沿着煤层传播的速度即为槽波传播的群速度,信号同一相位传播的速度为相速度。群速度和相速度可以相互转换,转换公式为:

$$u = \frac{d\omega}{d(\omega/c)} = \frac{d(ck)}{dk} = c + k \frac{dc}{dk} \quad (5)$$

式中: u 为群速度; k 为圆波数。

式(2),(5)定义了群速度-频率-厚度的数学关系。当频率 f 和厚度 d 给定时,根据式(2)可以求解相速度 c ,然后根据式(3)可以计算相应的群速度 u 。因此,当频率 f 固定时,有函数关系 $u = F(d)$;当煤层厚度固定时,有函数关系 $u = F(f)$ 。

2 研究区概况

W3₂32 工作面位于安徽省宿州市西南钱营孜煤矿西三采区中部。工作面及附近共发育断层 37 条,实际揭露 18 条断层。其中正断层 27 条,逆断层 10 条,褶曲和断层构造较发育,矿区地层岩性以泥岩和细砂岩为主。

3 槽波地震勘探实施

3.1 测点布置

根据钱营孜煤矿地质资料,将 W3₂32 工作面分里段、中段、外段共三站进行槽波地震探测。其中激发点炮间距 20m,接收点间距 10m,各站激发点、接收点、地震测线机巷、风巷、切眼,以及测线总长度布置情况详见表 1。

3.2 数据获取

地震数据的采集采用 1 台槽波地震仪在 W3₂32 工作面接收数据,形成单站一次可接收第

表 1 槽波地震测点布置

站名	激发点 个数	激发点编号 范围	接收点 个数	接收点编号 范围	测线机巷 长度/m	风巷长度 /m	切眼长度 /m	测线总长度 /m
里段	87	P1-1~1-P87	181	J1-1~J1-181	830	830	170	1830
中段	97	P2-1~P2-97	188	J2-1~J2-188	990	950	0	1940
外段	116	P3-1~P3-116	254	J3-1~J3-254	1370	1150	0	2520
总计	300		623		3190	2930	170	6290

一站 181 道、第二站 187 道和第三站 254 道的数据采集装置。研究区采用连续高效放炮,同组接收点固定接收的作业方式,并且射线覆盖勘探区域次数大于十次,保证了扇形的最大探测区域和勘探结果的可靠性。

4 槽波地震勘探数据处理及分析解释

4.1 槽波数据处理方法

为保证探测效果,需综合考虑研究区巷道分布、采掘设备位置、噪声干扰等因素明确炮点与接收点之间的几何位置,建立最佳的观测系统。本次槽波地震观测系统沿 W_{3,32} 风巷指向切眼方向为 X 轴正方向,垂直 W_{3,32} 风巷指向 W_{3,32} 机巷方向为 Y 轴正方向(图 4)。

应用煤矿地震槽波探测软件(CSSWD)对

P3-72 炮透射数据进行滤波处理(图 5)。未经滤波,横波与槽波区分不明显。经过滤波后,纵波和横波得到压制,槽波能量变强,特征明显。

4.2 槽波地震勘探结果及分析

4.2.1 横纵波波速反演结果及分析

煤层是波的低速介质,地震波在均匀煤层中传播时,表现为一较均匀分布的波速图。当煤层中出现断层或其他地质体时,表现为高速异常区。煤层破碎的区域也会表现为高速区域;煤层变薄或岩层变厚的区域则表现为低速异常区域。通过开展槽波地震勘探,发现研究区纵波速度平均值为 3.2m/ms(图 6),横波速度平均值为 1.9m/ms(图 7)。速度异常定义为平均值的 20%以上,则得出研究区纵波高速异常速度为 3.84m/ms,横波高速异常速度为 2.28m/ms。

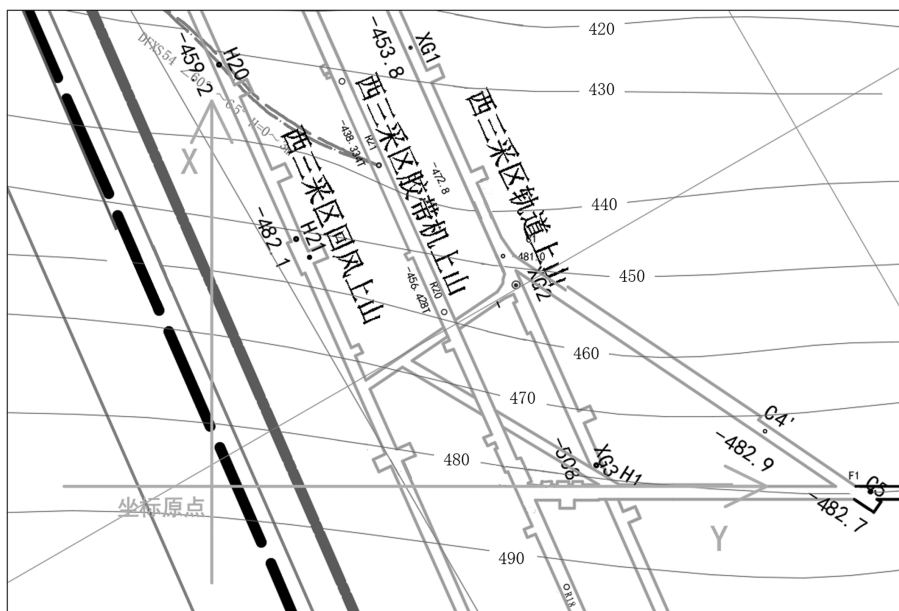
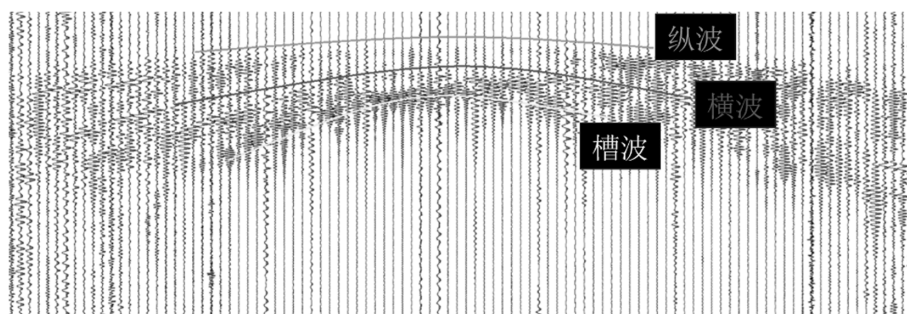
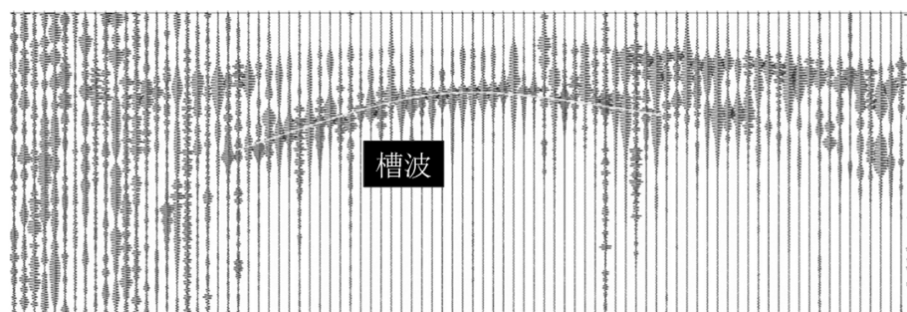


图 4 观测系统示意图



(a) 未经滤波处理



(b) 经滤波处理

图 5 P3-72 炮透射滤波处理前后地震波数据

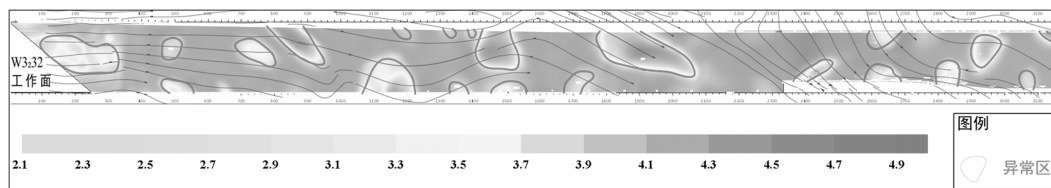


图 6 纵波速度成像图

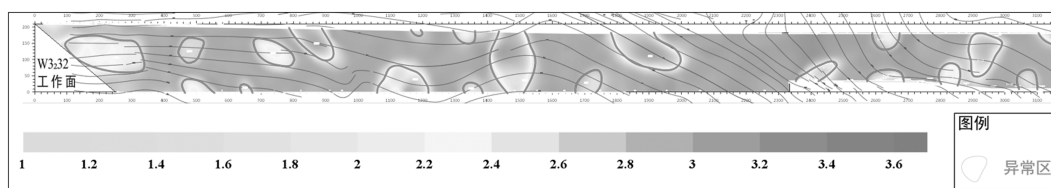


图 7 横波速度成像图

4.2.2 反射槽波的偏移成像结果及分析

在 KDZ2.8 软件平台对反探测数据进行包括预处理、数字滤波、修饰处理和偏移剖面形成与显示等时域处理。其中,探测区域内存在较大的走向断层,表现为高振幅(能量),代表有较强的能量被反射回来(图 8)。

4.2.3 槽波地震勘探综合结果及分析

在参考研究区煤层中的异常体资料的情况下,通过比较对照槽波能量衰减图、纵横波速度

反演图,并辅以反射偏移成像结果图,结合 W_{3,32} 工作面巷道地质编录剖面及三维地震解释资料对本次探测解释进行同步验证,共解译 33 个异常区(YC1-YC33)。以 F3 至 F7 段内 YC5-10 异常区为例,结合异常地质体对应的纵横波速度成像图、透射槽波能量衰减图和反射偏移成像图进行分析(图 9)。

YC5 异常区:位于面内,在透射槽波能量衰减图以及反射偏移成像图中反映明显,此区域为

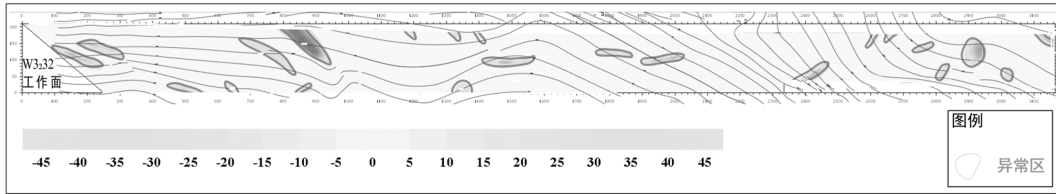
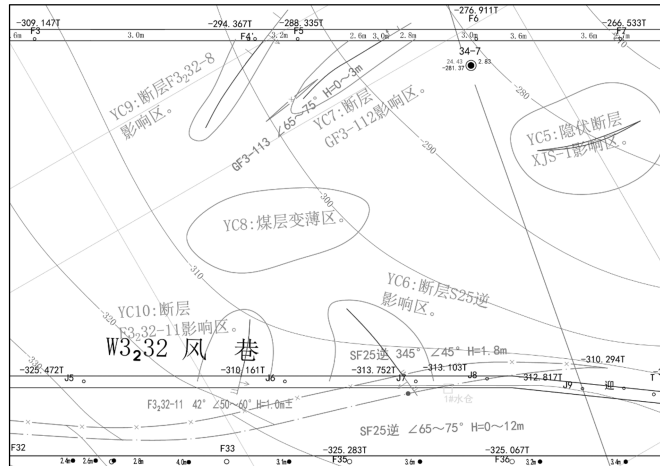
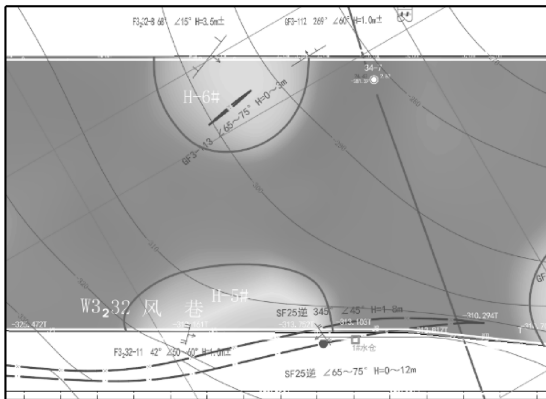


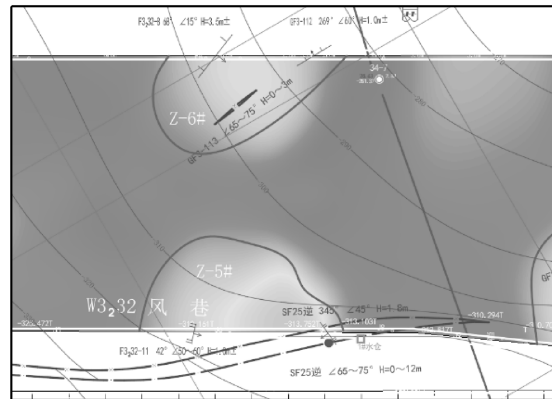
图 8 反射偏移成像图



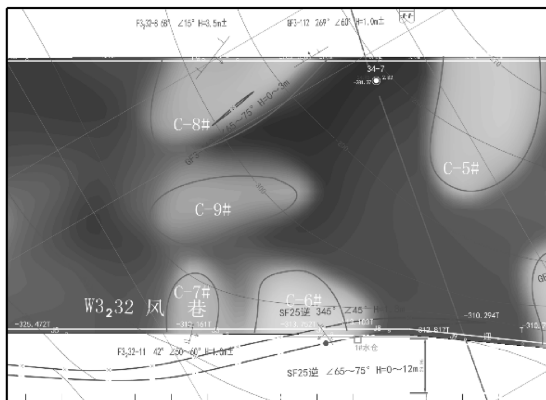
(a) 异常区分布



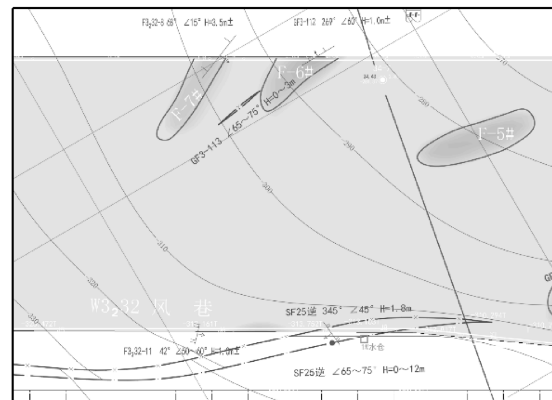
(b) 横波速度成像图



(c) 纵波速度成像图



(d) 透射槽波能量衰减图



(e) 反射偏移成像图

图 9 异常地质体综合分析

隐伏断层 XJS-1, 断层落差大于二分之一煤厚且小于煤厚。

YC6 异常区: 靠近风巷, 在纵横波速度成像图以及透射槽波能量衰减图中反映明显, 对应巷道揭露断层 SF25 逆。

YC7 异常区: 位于面内, 在透射槽波能量衰减图以及反射偏移成像图中反映明显, 此区域存在隐伏断层 XJS-1, 断层落差大于二分之一煤厚且小于煤厚。

YC6 异常区: 靠近风巷, 在纵横波速度成像图以及透射槽波能量衰减图中反映明显, 对应巷道揭露断层 SF25 逆。

YC7 异常区: 靠近机巷, 在纵横波速度成像图、透射槽波能量衰减图以及反射偏移成像图中反映明显, 对应巷道揭露断层 GF3-112。

YC8 异常区: 位于面内, 在透射槽波能量衰减图中有所反映, 分析为煤层变薄区, 面积约为 2179m²。

YC9 异常区: 靠近机巷, 在纵横波速度成像图、透射槽波能量衰减图以及反射偏移成像图中反映明显, 对应巷道揭露断层 F_{3,32-8}。

YC10 异常区: 靠近风巷, 在纵横波速度成像图以及透射槽波能量衰减图中反映明显, 对应巷道揭露断层 F_{3,32-11}。

7 个煤层变薄区的受影响面积如下图 10 所示。由图可知, 位于面内的 YC3 区域的煤层变薄区的受影响面积最大可达 7783m², 靠近风巷处的 YC2 区域的煤层变薄区的受影响面积最大

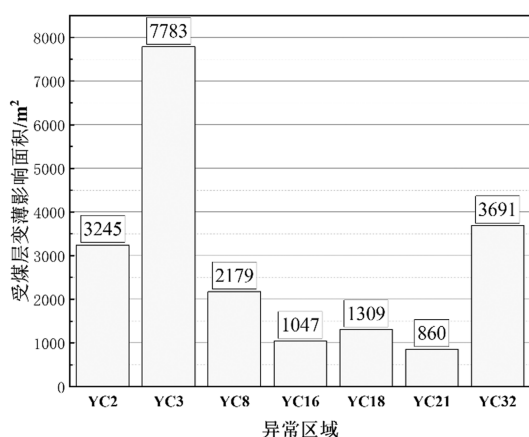


图 10 煤层变薄区的受影响面积

可达 3245m², 总体来看位于面内的煤层变薄区的受影响面积较靠近风巷处更大。

5 结论

(1) 在研究区采用槽波地震勘探技术探得隐伏断层 3 条, 其落差大于 1/2 煤厚但小于煤厚。

(2) 槽波地震勘探结果表明, 研究区煤层异常体呈现显著的波速与能量响应特征: 断层构造表现为纵横波速度异常 (纵波 $\geq 3.84\text{m/s}$, 横波 $\geq 2.28\text{m/s}$) 及反射波高振幅特征; 煤层变薄区则呈现低速异常 (如 YC8, 面积 2179m²)。统计分析显示, 工作面内部变薄区 (如 YC3, 7783m²) 的发育规模显著大于巷道邻近区域, 验证了槽波多参数联合反演在煤层构造精细探测中的可靠性。煤层变薄区的受影响面积在位于面内的异常区域较大, 在回采过程中需要着重注意, 且工作面内可能存在小于 1/2 煤厚断层, 在回采过程中更应加强实时监测。

(3) 建议在工作面回采过程中及时反馈现场回采煤厚资料或断层揭露情况, 以便及时修正反演参数, 以进一步提高资料的利用率, 更好的为安全生产服务。此外, 应加强对多种信息的地质编录, 增强对地质调查数据的利用程度, 从而更有利于槽波地震探测技术的应用, 为煤矿的安全高效生产带来更大的经济效益。

参考文献 (References):

- [1] 王胜春. 槽波地震反射法在斜沟矿地质构造探测中的应用[J]. 西部探矿工程, 2024, 36(05): 141-142+145.
- [2] 张国思. 槽波地震勘探技术在煤矿工作面构造探测中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(08): 164-168.
- [3] 侯群磊. 槽波地震勘探技术在断层探测方面的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, 38(14): 188-189.
- [4] 薛换成, 刘虎生, 王振荣, 等. 槽波地震勘探技术在断层探测中的应用[C]. 煤炭安全高效绿色智能开采地质保障学术会议论文集, 2020.
- [5] 凌春霞, 洗伟东. 槽波地震勘探技术在工作面采前探测中的应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(07): 109

- 112.
- [6] 李京涛,王书伦.槽波地震勘探技术在煤层地质探测中的应用[J].2024,42(05):131-135.
- [7] Evison F F. A coal seam as a guide for seismic energy [J]. Nature, 2013, 1955(176): 1224-1225.
- [8] Krey T C. CHANNEL WAVES AS A TOOL OF APPLIED GEOPHYSICS IN COAL MINING[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 1963.
- [9] Buchanan D J. Fault location by channel wave seismology in United Kingdom coal seams [J]. Geophysics, 1981, 46: 994-1002.
- [10] 刘国妍.槽波地震勘探技术在煤层构造探查中的应用[J].山西冶金,2023,46(04):192-193+201.
- [11] 马邮国,成龙,刘厚宁,等.槽波地震勘探技术在煤矿工作面构造探测中的应用[J].能源与节能,2023,28(06):179-182.
- [12] 王志斌,张海波.槽波地震勘探技术在山西寿阳段王煤矿中的应用[J].煤炭与化工,2024,47(01):62-69.
- [13] 刘文宝.槽波地震与无线电透视在地质勘探中的对比分析[J].煤,2019,28(04):68-70.
- [14] 余为维,冯磊,杜艳艳,等.煤层陷落柱的三维地震槽波正演模拟[J].煤炭技术,2019,38(03):73-76.
- [15] 刘百祥.煤矿瓦斯富集区电磁波多频同步CT探测技术研究与应用[J].矿业安全与环保,2019,46(04):49-53.
- [16] 刘建伟.巷道突水分析及槽波地震法探明小断层的应用[J].江西煤炭科技,2020,42(04):164-166.
- [17] 杨焱钧,朱书阶,张孝文,等.反射槽波探测技术中速度分析方法研究[J].煤田地质与勘探,2020,48(05):218-224.
- [18] 冯晓红.地震槽波勘探技术在采煤工作面构造探测方面的应用[J].煤,2021,30(07):50-51.
- [19] 裴江涛,杨璐,骆祖江.江苏海门地区地面沉降成因分析[J].华东地质,2023,44(04):467-475.
- [20] 黄德华.基于InSAR技术的大同市云冈矿区地面沉降监测[J].华东地质,2023,44(04):476-484.
- [21] 朱红兵,陈国光,赵东东,等.微动探测技术在地质结构研究中的应用——以福州滨海新城核心区为例[J].华东地质,2022,43(03):297-305.
- [22] 程建远,王会林.煤矿地质保障技术现状与智能探测前景展望[J].智能矿山,2020,1(01):35-45.
- [23] 龙自阳.槽波地震反射法长距离探测技术在煤层构造探查中的应用研究[J].能源科技,2022,20(02):26-29.
- [24] 陈勇,赵清全,吴教锟,等.工作面地质构造震电探测响应特性与佐证分析[J].中国安全生产科学技术,2023,19(11):20-28.

作者简介:

第一作者/通讯作者:张小虎,1986年生,男,安徽淮北人,恒源煤电股份有限公司钱营孜煤矿,工程师,主要研究方向为土木工程(矿建方向)。Email:418413088@qq.com

The Application of Channel Wave Seismic Exploration Technology in the Detection of Concealed Faults in Coal Mines —Case Study of Qianyingzi Coal Mine

ZHANG Xiaohu^{1*}, WANG Zongtao², LAN Pengbo², SUN Weihao², REN Chuan²

(1. Anhui Hengyuan Coal Power Co., Ltd. Qianyingzi Coal Mine, Suzhou 234116, China;

2. Anhui Hui Zhou Geological Safety Research Institute Co., Ltd., Hefei 231200, China)

Abstract: The existence of hidden faults poses a serious hidden danger to the production safety in the process of coal mining. Therefore it is an important measure to find out the hidden fault structure of coal mine, which is crucial to ensure the smooth mining of working face and efficient and safe production in the future. In this paper, the in-seam wave geophysical prospecting method is used to work on the W3₂32 working face of Qianyingzi Coal Mine, which aims to find out the fracture development and hidden geological bodies in the study area. Through the comparative analysis of in-seam wave energy attenuation and P-wave and S-wave velocity inversion in the study area, supplemented by reflection migration imaging, 33 abnormal areas are explained in the study area, including 24 fault-affected areas, 7 coal seam thinning areas, and 2 roof puncture structure-affected areas, which provide important support for coal mine safety production in the study area.

Key words: slot wave seismic exploration; hidden structure; fault; thin coal seam area; Qianyingzi Coal Mine